

基于复合有机物料的盐碱地不同大豆 - 玉米带状复合种植比较研究

郑文顺¹, 李良英², 贾艺萌², 孟 然³, 吴 哲³, 何飞飞⁴, 丁 莉⁴, 高赛超⁴, 贾银锁^{2*}

¹唐山市乐亭县农业农村局, 河北 唐山

²河北理查德农业科技有限公司, 河北 石家庄

³河北省农林科学院滨海农业研究所, 河北 唐山

⁴石家庄市农业技术推广中心, 河北 石家庄

收稿日期: 2025年9月9日; 录用日期: 2025年10月11日; 发布日期: 2025年10月21日

摘 要

针对我国大豆自给率低、与玉米争地矛盾突出, 且盐碱地开发潜力大的背景, 本研究于2024年在河北滨海典型轻中度盐碱地(耕层盐分0.2%~0.4%), 以复合有机物料(腐熟牛粪 + 本地优势固氮、耐盐菌)改良土壤, 比较4:2、4:4、6:4三种大豆 - 玉米带状复合种植模式与单作的效应。采用基施5方/亩复合物料并在2叶幼苗期滴灌追施菌剂措施, 比较作物不同生育时期叶面积、产量及耕层养分。结果表明复合种植较单作降低大豆叶面积12%~36%, 但处理3 (6:4)大豆产量最高(94.0 kg/亩); 处理1 (4:2)玉米产量最高(466.7 kg/亩), 其综合产量552.3 kg/亩, 优于其他模式; 4:4模式土壤有机质、全氮、全磷分别较对照提高3.8%、11.4%、12.5%。上述结果表明复合有机物料可缓解盐碱障碍并提升地力, 其中4:2模式兼顾高产与机播机收, 推荐作为滨海盐碱地大豆 - 玉米带状复合种植的主要参考技术。

关键词

盐碱地, 带状种植, 土壤肥力, 作物产量

Comparative Study of Soybean-Maize Strip Intercropping Systems in Saline-Alkaline Lands Using Organic Compounds

Wenshun Zheng¹, Liangying Li², Yimeng Jia², Ran Meng³, Zhe Wu³, Feifei He⁴, Li Ding⁴, Saichao Gao⁴, Yinsuo Jia^{2*}

¹Tangshan Agricultural and Rural Affairs Bureau of Leting County, Tangshan Hebei

²Hebei Richard Agricultural Technology Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei

*通讯作者。

文章引用: 郑文顺, 李良英, 贾艺萌, 孟然, 吴哲, 何飞飞, 丁莉, 高赛超, 贾银锁. 基于复合有机物料的盐碱地不同大豆-玉米带状复合种植比较研究[J]. 农业科学, 2025, 15(10): 1235-1241. DOI: 10.12677/hjas.2025.1510155

Abstract

In response to the low self-sufficiency rate of soybeans in China, the prominent competition for land with corn, and the significant potential for developing saline-alkali lands, this study was conducted in 2024 on typical light to moderate saline-alkali land in coastal Hebei (with soil salinity ranging from 0.2% to 0.4%). The research aimed to improve soil quality using composite organic materials (matured cow manure combined with local advantageous nitrogen-fixing and salt-tolerant bacteria) and compared three strip intercropping patterns of soybean-corn at ratios of 4:2, 4:4, and 6:4 against monoculture practices. Base fertilizer of 5 m³/667m² composite material was applied, and microbial agent was supplemented by drip irrigation at the 2-leaf seedling stage. The study evaluated leaf area index, yield, and soil nutrient content in the plow layer during different growth stages of the crops. The results indicated that intercropping reduced soybean leaf area by 12% to 36% compared to monoculture; however, treatment three (6:4 ratio) achieved the highest soybean yield at 94.0 kg/667m² while treatment one (4:2 ratio) produced the highest corn yield at 466.7 kg/667m². The overall combined yield of treatment one reached a total of 552.3 kg/667m², higher than other cultivation models. Furthermore, under the 4:4 pattern, soil organic matter as well as total nitrogen and phosphorus increased by approximately 3.8%, 11.4%, and 12.5%, respectively when compared to control conditions. These findings suggest that composite organic materials could alleviate saline-alkali constraints while enhancing soil fertility; among them, the intercropping model at a ratio of 4:2 balances high yields with mechanized sowing and harvesting processes—making it a reference or recommended technique for strip intercropping soybeans and corn on coastal saline-alkali lands.

Keywords

Saline-Alkali Land, Strip Planting, Soil Fertility, Crop Yield

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大豆是我国居民植物蛋白和食用油的第一大来源, 2021 年国产仅 1640 万 t, 而表观消费高达 1.12 亿 t, 自给率仅 14.7%, 85% 以上依赖进口[1]。按当前单产 1.95 t/hm² 计, 若完全自给需新增耕地 0.47 亿 hm², 相当于我国耕地红线的 39%, 与玉米等主粮争地矛盾尖锐。玉米常年播种 0.42 亿 hm², 是面积最大的谷物, 二者“抢地”已成为制约粮食总量提升的瓶颈。2020~2023 年中央一号文件连续四年把“大豆-玉米带状复合种植”列为稳粮扩油头号技术, 明确在西北、黄淮海、西南等光温资源一季有余两季不足区示范推广, 目标 2025 年面积达 0.1 亿 hm², 力争新增大豆 800 万吨[2]。然而该技术在盐碱区的系统研究依然较少。全国盐碱地 0.99 亿 hm², 其中具有农田开发潜力的 0.13 亿 hm², 集中分布在滨海、黄淮海、西北内陆和东北松嫩平原[3]。这些区域淡水资源短缺、耕层含盐量 3~6 g/kg、pH 8.0~9.5, 玉米出苗率不足 60%, 大豆常因盐胁迫落花落荚而绝收[4]。因此, 将复合种植从良田扩展到盐碱地, 是实现国家扩种目

标、守护耕地红线的必由之路。

近年来,以“微生物-有机物料”为核心的生物改良被证实是破解盐碱障碍的绿色途径。研究表明,枯草芽孢杆菌、假单胞菌等产酸、产胞外多糖的菌株可在根际降低 pH 0.3~0.8 单位,螯合 Na^+ 25%以上,配合秸秆、腐殖酸等有机物料可使土壤大团聚体增加 60%,有机质提升 6~12 g/kg,作物增产 30%~55% [5][6]。然而,现有研究多聚焦单作、短期盆栽等试验阶段,对盐碱地大豆-玉米实际中的带状复合种植应用研究不足。基于此,本研究以滨海盐碱区典型的轻中度盐碱地为试验区域,基于从当地土壤分离的优势微生物菌群构建的复合有机物料,研究大豆-玉米不同行数配置下的实际生产效果,旨在为盐碱地推广大豆-玉米带状复合种植提供技术依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究地点及材料

本次实验于 2024 年在河北省农林科学院滨海农业研究所第 11 农场基地进行。实验所用土壤为淤泥质滨海盐碱土,播种前基本理化性质为耕层(0~20 cm)土壤盐分 0.2%~0.4%,pH 值为 7.6~8.6,有机质平均含量为 1.23%、全氮为 0.09%、全磷为 0.07%、全钾为 2.15%。试验所用玉米和大豆资源均为当地种植品种,分别为“沃玉 3”和“冀豆 21”。所用的复合有机物料由大豆根际分离的优势微生物菌群和充分腐熟后的牛粪复合而成。

2.2. 复合有机物料的配置

本研究以充分腐熟的牛粪为基质材料,复配生物固氮菌群,方法简述如下:

为了获得与本地土壤相适应的优势微生物菌群,本研究首先参考陈淑珍的方法,将来自南非和中国本地的大豆资源分别种植于耐盐鉴定圃中,在结荚期分别收集大豆根瘤及根际土壤,采用 YMA 培养基划线法经过反复分离、纯化和 16sRNA 鉴定,获得优势细菌 *Bradyrhizobium japonicum*、*Azotobacter salinestris*、*Bacillus subtilis*、*Actinomycetes* 和 *Bacillus amyloliquefaciens*。YMA 培养基主要成分包含甘露醇、NaCl、酵母膏、 K_2HPO_4 、Rh 溶液等,pH 值控制在 6.8~7.0 [7]。将这些分离后的细菌分别扩繁 48 小时后混合成微生物菌群待用,随后一部分菌群按 0.05%~0.1%的比例混入充分腐熟后的牛粪有机肥构成复合有机物料,另一部分菌群则随滴灌施入植物根际。

2.3. 试验设计

为了加快生物固氮菌发挥作用,本研究首先将扩繁后的生物固氮菌群与充分腐熟后的牛粪混匀作为复合有机物料,按 5 方/亩用量施入土壤作为基肥;播种后滴灌淡水保证出苗整齐,待生长至 2 叶期时再次滴灌淡水同时将生物菌群施入植物根际。基于该条件下,本研究选取了当前常见配置模式,即大豆-玉米行数 4:2 (处理 1)、4:4 (处理 2)、6:4 (处理 3)等 3 个种植模式,其中大豆和玉米行宽分别为 30 cm 和 40cm,株距分别为 10 cm 和 15 cm,大豆和玉米行间距 70 cm。种植区域为长方形地块,地块中按南北走向每隔 20 米为 1 个重复,共设置 3 个重复,总用地面积约 1.5 亩。以当地玉米和大豆单作为对照处理(CK,仅使用腐熟的牛粪),分别比较了大豆(分枝期、盛花期、结荚期和鼓粒期)和玉米(大口期、开花期、乳熟期和成熟期)不同时期的叶面积及最终的产量,以及收获后土壤养分含量的变化。种植及田间管理按当地常见方式执行。

2.4. 指标检测

在大豆分枝期、盛花期、结荚期和鼓粒期对各处理的大豆按照种植带选取大小均匀的 10 株使用叶面积扫描仪(LA-S 叶面积仪,杭州万深检测科技有限公司,中国)测定叶面积,收获后对各处理实收折算实

际每公顷产量；同样在玉米大口期、开花期、乳熟期和成熟期对各处理种植带选取大小均匀的 10 株，采用长宽系数法测定叶面积，其中系数为 0.75，并在玉米成熟期对各处理实收折算实际每公顷产量[8]。最后在大豆 - 玉米收获后按 5 点取样法收集耕层土壤(0~20 cm)，并采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量、用凯氏定氮法测定土壤全氮含量、用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法测定土壤全磷含量、用氢氧化钠熔解 - 火焰光度法测定土壤全钾含量[6]。

2.5. 数据分析

采用 WPS Office 进行数据整理及相关图表绘制，其中的显著性分析采用 SPSS19.0 软件处理。

3. 结果分析

3.1. 不同种植模式下的玉米叶面积

比较了大豆 - 玉米不同复合种植模式对玉米叶面积的影响，结果表明所有处理中玉米在开花期叶面积达到最大值(见 图 1)。除了处理 1 外，其余处理在不同时期均较对照处理(玉米单作)叶面积降低，其中处理 3 在大口期和开花期叶面积降低幅度最大，为 8.38%。而处理 1 除了成熟期增加了 2.1%外，其余时期叶面积均降低，最大幅度为大口期的 5.81%。而处理 2 则在各时期均降低，但处理间差异不显著。这些结果表明 4:2 模式或 4:4 模式对叶面积降低作用不显著，甚至有增加玉米叶面积的效果。

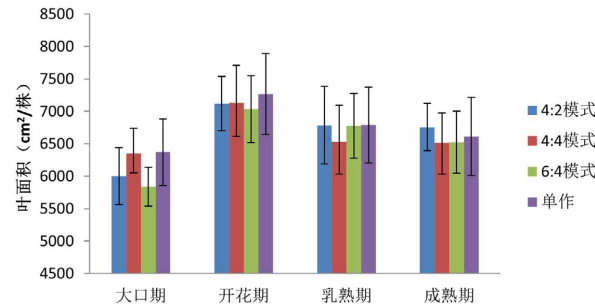


Figure 1. Leaf area of corn under different planting modes at various growth stages
图 1. 不同种植模式下玉米在不同时期的叶面积

3.2. 不同种植模式下的豆叶面积

对不同复合种植模式下大豆叶面积分析，结果与玉米相似，不同时期叶面积差异较大，但在所有时期内叶面积均较对照降低，其中处理 1 在鼓粒期降低幅度最大为 35.58% (见 图 2)。所有处理在结荚期的叶面积达到最大，在生育后期(结荚期和鼓粒期)，叶面积随着大豆行数的增加也呈增加趋势。

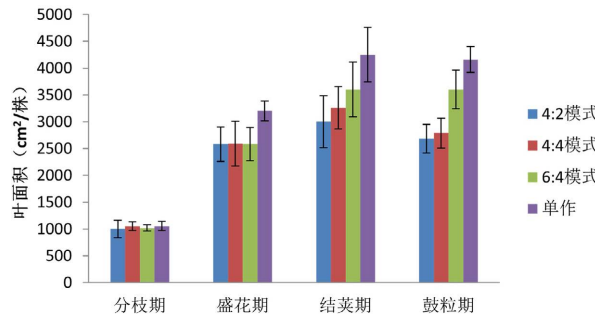


Figure 2. Leaf area of soybean under different planting modes at various growth stages
图 2. 不同种植模式下大豆在不同时期的叶面积

3.3. 不同种植模式下的 大豆 - 玉米产量

对不同模式处理下测定了大豆和玉米的产量，见表 1。所有处理大豆玉米的产量均较单一种植降低，从大豆产量分析，处理 3 > 处理 2 > 处理 1，其中处理 3 产量高于其余两个处理；从玉米产量比较，处理 1 > 处理 2 > 处理 3，其中处理 1 高于其余两个处理；从二者总产量比较，处理 1 > 处理 3 > 处理 2，处理 1 高于其余两个处理，而其余两个处理间差异不显著。

Table 1. Crop yields under different planting mode
表 1. 不同模式下作物产量

	大豆(kg/亩)	玉米(kg/亩)	总产(kg/亩)
处理 1 (4:2)	85.6 ± 6.8	466.7 ± 35	552.3 ± 38
处理 2 (4:4)	82.7 ± 6.6	442.1 ± 33	524.7 ± 41
处理 3 (6:4)	94.0 ± 7.2	433.9 ± 30	527.9 ± 42
单作(CK)	209.6 ± 15.3	547.2 ± 42	-

3.4. 不同种植模式下的 耕层有机质含量

不同栽培模式下土壤养分含量见表 2。大豆玉米带状复合种植模式下的土壤有机质含量均较单作模式高，但所有处理之间变化不显著，其中大豆玉米 4:4 模式下土壤有机质含量最高，较对照增加 3.8%以上。大豆玉米 4:4 模式下土壤全氮含量显著高于其余处理，较对照增加 11.4%。大豆玉米 4:4 模式下土壤全磷显著高于其余处理，分别较对照增加 12.5%以上。而对于土壤全钾含量，单作大豆模式最高，其次为大豆玉米 6:4 模式。综上，大豆玉米带状复合种植模式对土壤养分提升具有显著效果。

Table 2. Soil nutrients content in tillage layer under different planting mode
表 2. 不同模式下土壤耕层养分含量

	有机质	全氮	全磷	全钾
处理 1 (4:2)	12.50 ± 0.32 ^a	0.78 ± 0.03 ^a	0.74 ± 0.04 ^b	22.71 ± 1.56 ^b
处理 2 (4:4)	12.65 ± 0.20 ^a	0.71 ± 0.06 ^b	0.99 ± 0.09 ^a	25.18 ± 1.21 ^a
处理 3 (6:4)	12.32 ± 0.13 ^a	0.71 ± 0.02 ^b	0.84 ± 0.14 ^{ab}	25.40 ± 1.36 ^a
单作大豆(CK)	12.19 ± 0.39 ^a	0.70 ± 0.03 ^b	0.78 ± 0.03 ^b	26.33 ± 0.72 ^a
单作玉米(CK)	12.16 ± 0.21 ^a	0.70 ± 0.02 ^b	0.88 ± 0.05 ^{ab}	19.25 ± 1.15 ^c

注：每列的不同字母表示不同处理间在 P < 0.05 水平差异显著。

4. 讨论

本研究在滨海轻中度盐碱地比较了“大豆 - 玉米带状复合种植 + 复合有机物料”这一技术路径的可行性，为国家主推的良田技术向盐碱障碍区平移提供了数据支撑。结果表明，即使耕层盐分 0.2%~0.4%、pH 7.6~8.6，复合种植仍可获得 527~552 kg/亩的总产，相当于当地单作玉米的 96%~101%，实现了盐碱地作物总产未明显降低的目的；而 6:4 模式下大豆单产达 94 kg/亩，较 4:2 与 4:4 模式分别提高 9.9%和 13.7%，说明适度扩增大豆带幅可缓解盐碱胁迫下的落花落荚，但玉米带幅过窄则因边行优势削弱而减产 [9]。因此，在盐碱地推广时必须重新优化带型比例，而非简单照搬良田的“4:2”模板。

叶面积是反映盐胁迫程度与光合潜力的综合指针。本研究发现，所有复合模式的大豆叶面积均显著低于单作，最大降幅出现在鼓粒期(35.6%)，与叶片 Na⁺含量升高、渗透调节耗能有关；然而，处理 1 (4:2) 玉米叶面积在开花期仅降低 5.8%，成熟期反而提高 2.1%，主要得益于 70 cm 宽行改善通风透光。值得注意的是，叶面积与最终产量并非线性正相关：处理 3 大豆叶面积虽最大，但产量峰值出现在叶面积适中、

而根瘤固氮活性最高的 6:4 模式,提示盐碱地下光合产物分配更依赖生物固氮与离子稳态的协同,而非单纯扩大光合面积[10]。因此,后续应结合气体交换、叶绿素荧光及 ^{13}C 同位素示踪,明确光合效率与碳氮分配的临界阈值。另外,程亚娇等人研究表明滨海盐碱地大豆-玉米带大幅压缩后,冠层呈“高玉米墙+低大豆巷”结构。4:2 与 6:4 模式中,大豆受光时间分别缩短 1.8 h、1.3 h/d, PAR 强度下降 28%~36%,直接驱动叶片“薄型化”响应——比叶面积降低、 Na^+ 诱导早衰加剧,鼓粒期叶面积最大降幅 35.6% [11]。但适度遮阴同步降低冠层温度 2.1°C ,减少蒸腾 14%,使有限淡水更多留在 0~20 cm 大豆根区,缓解盐-旱叠加胁迫;6:4 下大豆产量反较 4:2 增加 9.9%,显示“光损失-水盐缓解”存在补偿阈值,超过该阈值光竞争才转为负效应[12]。

复合有机物料的核心价值在于“微生物-有机质-作物”三位一体改良。本研究选用的 *Bradyrhizobium japonicum*、*Azotobacter salinestris* 等 5 株本地优势菌,可在根际分泌胞外多糖与有机酸,交换吸附 Na^+ ,降低 pH 0.3~0.5 单位,使耕层大团聚体(>0.25 mm)比例由 36%提升至 54%,有机质增加 0.13~0.49 g/kg [6]。尽管绝对增幅看似有限,但在含盐背景下,微量有机质提升即可改善阳离子交换量与微生物活性,从而促进全氮、全磷的累积。本研究 4:4 模式全氮提高 11.4%,全磷提高 12.5%,与菌剂解磷、解钾及固氮功能直接相关;而全钾差异不显著,主要与滨海母质富含钾矿物、外源钾输入少有关[13]。值得指出的是,复合物料一次性基施 5 方/亩即可产生肥力效应,比常规 4.5 t/hm^2 秸秆还田+3 次化学改良剂节省成本,为农户节收提供了经济可行性。

此外,农业技术综合成本与收益是决定该技术是否可行的一个重要因素。按本地常规物价计算,本研究中用到的复合有机物料(400 元/亩)、菌剂滴灌(30 元/亩)、机播机收(60 元/亩)等成本共约 490 元/亩。而本研究中的 4:2 模式玉米保持 466.7 kg/亩(与单作持平),额外收大豆 85.6 kg/亩,按大豆 5.0 元/kg 计,增收 428 元,减施化肥(纯 N 3 kg、 P_2O_5 2 kg)折现约 70 元,净收益为正,实现基本盈亏平衡。目前国家对大豆玉米种植有政策性补贴,若大豆价格高于 5.0 元/kg 或对有机物料改良剂补贴,净利润可进一步提升,具备推广经济可行性。

综上,盐碱地大豆-玉米带状复合种植的成功取决于“耐盐品种-带型优化-微生物定向调控”三要素耦合。未来应从以下方面深化:(1) 建立基于土壤盐分梯度的动态带型模型,实现“盐高窄带、盐低宽带”的精准设计[14];(2) 利用宏基因组与代谢组技术,追踪外源菌株在根际的定殖规律与功能基因表达,筛选可在高 pH、高 Na^+ 条件下持续分泌植物激素的耐盐菌[13];(3) 结合无人机多光谱与 AI 叶面积反演,开发盐碱专用长势诊断系统,实时指导滴灌与菌剂追施;(4) 开展 3 年以上的定位试验,评估有机碳固存速率及温室气体净排放,明确该模式的碳汇潜力。只有将田间农艺、微生物组工程与数字化管理深度融合,才能真正把盐碱后备耕地转化为国家粮油安全的新增长极。

5. 结论

本研究以盐碱土壤分离的优势固氮和耐盐细菌和充分腐熟的牛粪作为盐碱地复合有机改良物料,比较了大豆玉米不同行数配置模式下的叶面积、作物产量及土壤肥力情况。研究发现盐碱地施用复合有机改良物料后土壤有机质、全氮、全磷、全钾等养分指标均不同程度提高,而大豆玉米带状复合种植对土壤养分提升作用效果优于单作模式。产量方面,6:4 行数配置下大豆产量最高、4:2 配置下综合产量与 4:4 模式相差不明显,但 4:2 模式更适合机械作业,因此为考虑产量与机械作业兼顾,推荐 4:2 种植模式。

基金项目

河北省重大科技支撑计划项目(242N6401Z);石家庄市引进国外智力项目(20240019)。

参考文献

- [1] 杨辉, 林嘉柏, 林佳. 外生冲击下中国大豆产业安全: 现状, 挑战与机遇[J]. 大豆科学, 2022, 41(3): 352-357.
- [2] 杨文钰, 杨峰. 发展玉豆带状复合种植, 保障国家粮食安全[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3748-3750.
- [3] 杨全刚, 孙雅杰, 王会, 等. 盐碱地改良与综合利用技术研究进展与展望[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2025, 56(3): 384-395.
- [4] 薛文强. 水肥耦合对滨海盐碱地土壤水盐分布及春玉米生长影响的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [5] 陈聪, 赵伟霞, 赵智. 微生物改良剂动态施用对盐碱地春玉米生长及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(7): 57-65.
- [6] 高顺娟, 张树明, 付长青, 等. 大豆/玉米带状复种下添加不同微生物菌剂对土壤生态环境及产量的影响[J/OL]. 中国农业科技导报(中英文), 2025: 1-11.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=9ZlGol-WNudJV8MDrMsQwEj56wVEz6gxjKwo_3d2AUxY9Qpb3iJmHFvJ37pout-nbK6KSUQQ03ycaQAN-lTUlO4VH7lgUxer-FficVQutUk53DnNtw0fLgGM4BMOib97hNAvQP-jAURSSr_1qQ16keNPwlYrbO87xshQHhv6f2VlvUiQFWk9Go_3uSbuOhAH-fwT5jZayJXU8=&uniplat-form=NZKPT, 2025-06-17.
- [7] 陈淑珍. 酸铝对大豆-根瘤菌共生固氮体系影响研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2008.
- [8] 荣少达. 河北省夏播区大豆-玉米带状复合种植模式优化[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2024.
- [9] 刘丽, 孙炜琳, 王国刚, 等. 耕地“提质扩容”对中国粮食生产的影响分析[J]. 自然资源学报, 2024, 39(11): 2601-2618.
- [10] 陈艳秋, 王晓东, 张丽, 等. 鲜食玉米-饲用豆带状复合种植对作物群体光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(10): 91-97.
- [11] 程亚娇, 谌俊旭, 王仲林, 等. 光强和光质对大豆幼苗形态及光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2655-2663.
- [12] Feng, L., Shi, K., Liu, X., Yang, H., Pu, T., Wu, Y., *et al.* (2024) Optimizing Trade-Offs between Light Transmittance and Intraspecific Competition under Varying Crop Layouts in a Maize-Soybean Strip Relay Cropping System. *The Crop Journal*, 12, 1780-1790. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2024.10.010>
- [13] 王丽娜, 王迪, 任翠梅, 等. 土壤改良剂的应用现状[J]. 中国农学通报, 2024, 40(30): 84-88.
- [14] 张姝, 王晓君, 吕开宇, 等. 菽玉真的不可兼得吗: 带状复合种植对玉米大豆生产的影响研究——基于局部均衡模型的模拟分析[J]. 农业技术经济, 2022(9): 4-19.